

溶質元素補給ゾーン成長法による均一組成を持った 多元系バルク単結晶の開発

著者	中嶋 一雄
URL	http://hdl.handle.net/10097/41534

溶質元素補給ゾーン成長法による
均一組成を持った多元系バルク単結晶の開発

研究課題番号 11305001

平成 11 年度～平成 12 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）

研究成果報告書

平成 13 年 3 月

研究代表者 中嶋 一雄

(東北大学金属材料研究所教授)

東北大学図書



00021003565

附属図書館

溶質元素補給ゾーン成長法による
均一組成を持った多元系バルク単結晶の開発

研究課題番号 11305001

平成 11 年度～平成 12 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）

研究成果報告書

平成 13 年 3 月

研究代表者 中嶋 一雄

(東北大学金属材料研究所教授)

はしがき

本報告書は、平成 11～12 年度の 2 年間にわたり、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)課題番号 11305001）を受けて行われた「溶質元素補給ゾーン成長法による均一組成を持った多元系バルク単結晶の開発」に関連する研究成果をまとめたものである。

多元系半導体薄膜を利用した半導体ヘテロ構造によるバンドエンジニアリングは、薄膜成長技術の発展に伴い、半導体レーザや、高速トランジスタなど多くの光・電子デバイス構造に取り入れられ、既に実用化に至っている。しかしながら、半導体ヘテロ構造の基板として利用できる材料は、GaAs、InP、Si など数少ない材料に限定されているのが現状である。そのため、格子整合が可能な材料系は限定され、半導体ヘテロ構造を利用したデバイスの中には、格子不整合に起因するミスフィット転位導入のため目的の特性を実現できないものも数多い。一方、バンドエンジニアリングに「歪み」を積極的に取り入れ、電子帯構造を制御する試みも盛んに行われているが、基板材料の制限により、歪み方向や、転位導入の臨界膜厚の大きさなど、材料設計の自由度は、狭められている。

この問題点を解決する最も確実な手法は、均一組成を有する多元系半導体バルク結晶を作製し、基板の格子定数とバンドギャップの選択肢を拡大することである。しかしながら、多元系結晶が全率固溶型の状態図を有することから理解できるように、結晶の組成は、成長界面の温度や溶液組成の変化に対して、敏感に変化してしまい、組成均一化は極めて困難とされてきた。そこで研究代表者の中嶋らは、溶質元素の枯渇を防ぐ新たな手法として、適切な温度勾配を持った成長装置の中で、成長用溶液を間に挟んで、低温側に種結晶を、高温側に溶質元素補給用結晶を配置し、高温側の結晶から拡散により溶質元素を補給するゾーン成長法を提案し、多元系半導体バルク結晶の作製に取り組んできた。その過程で、溶質元素補給と成長界面温度を一定に保つ技術を両立させることの重要性を再認識した。

本研究においては、固液界面の位置・温度の「その場観察」が可能な結晶成長炉の開発を進め、界面位置・温度のモニター技術確立し、界面温度を一定に制御しながら結晶成長を行うことを可能とした。実際に、この技術を適用することにより 20mm 以上にわたり組成が均一な $\text{Si}_{0.15}\text{Ge}_{0.85}$ バルク結晶を作製することに成功した。今後は、任意の組成の SiGe バルク結晶や、InGaAs バルク結晶など他の材料系へも、この手法を適用し、独自の基板とエピタキシャル成長技術の融合による機能性材料の創製へと展開していく。

詳細を以下に報告するが、関連する成果として、坩堝中の高温溶液の組成分布測定手法、半導体ヘテロ構造の成長モード状態図についての成果なども併せて報告する。

研究組織

研究代表者：中嶋 一雄 (東北大学金属材料研究所教授)
研究分担者：宇佐美 徳隆(東北大学金属材料研究所助教授)
研究分担者：佐崎 元 (東北大学金属材料研究所助手)
研究分担者：宇治原 徹 (東北大学金属材料研究所助手)
研究分担者：宮下 哲 (富山医科薬科大学医学部助教授)
研究分担者：石川 浩 ((株)富士通研究所基盤技術研究所主席研究員)

研究協力者：我妻 幸長 (東北大学大学院理学系研究科大学院生)
研究協力者：村上 義弘 (東北大学金属材料研究所技官)
研究協力者：藤原 航三 (東北大学金属材料研究所助手)
研究協力者：手塚 宏茂 (古河機械金属株式会社開発本部素材総合研究所)
研究協力者：児玉 茂夫 ((株)富士通研究所材料技術研究所主任研究員)
研究協力者：西嶋 由人 ((株)富士通研究所基盤技術研究所主任研究員)

研究経費

平成 11 年度	32,100 千円
平成 12 年度	8,500 千円
計	40,600 千円

研究発表

1. 学会誌等

- (1) K. Nakajima, S. Kodama, S. Miyashita, G. Sazaki and S. Hiyamizu, "Growth of Ge-rich $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ single crystal with uniform composition ($x=0.02$) on a compositionally graded crystal for use as GaAs solar cells", J. Crystal Growth **205**, 270-276 (1999).
- (2) K. Nakajima, T. Ujihara, S. Miyashita and G. Sazaki, "Phase diagrams and stable structures of Stranski-Krastanov structure mode for III-V ternary quantum dots", J. Korean Association of Crystal Growth **9**, 387-395 (1999).
- (3) Y. Nishijima, K. Nakajima, K. Otsubo and H. Ishikawa, "InGaAs single crystal with a uniform composition in the growth direction grown on an InGaAs seed using the multicomponent zone growth method", J. Crystal Growth **208**, 171-178 (2000).
- (4) K. Nakajima, S. Miyashita, G. Sazaki, "Thickness dependence of stable structure of Stranski-Krastanov mode in the GaPSb/GaP system", J. Crystal Growth **209**, 637-647 (2000).
- (5) T. Ujihara, G. Sazaki, S. Miyashita, N. Usami and K. Nakajima, "In-situ measurement of composition in high temperature solutions by the X-ray fluorescence spectrometry" Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 5981-5982 (2000).
- (6) N. Usami, Y. Azuma, T. Ujihara, G. Sazaki, Y. Yakabe, T. Kondo, S. Koh, B. Zhang, Y. Segawa, Y. Shiraki, S. Kodama, and K. Nakajima, "SiGe bulk crystal as a lattice-matched substrate to GaAs for solar cell applications", Appl. Phys. Lett. **77**, 3565-3567 (2000).
- (7) K. Nakajima, T. Ujihara, G. Sazaki, and N. Usami, "Phase diagram calculation for epitaxial growth of GaInAs on InP considering the surface, interfacial and strain energies", J. Crystal Growth **220**, 413-424 (2000).
- (8) K. Nakajima, T. Ujihara, S. Miyashita, and G. Sazaki, "Effects of misfit dislocation and AlN buffer layer on the GaInN/GaN phase diagram of the growth modes", J Appl. Phys. **89**, 146-153 (2001).
- (9) Y. Azuma, N. Usami, T. Ujihara, G. Sazaki, Y. Murakami, S. Miyashita, K. Fujiwara, and K. Nakajima, "Growth of SiGe bulk crystal with uniform composition by directly controlling the

growth temperature at the crystal-melt interface using in-situ monitoring system”, J. Cryst. Growth (to be published).

(10) G. Sazaki, Y. Azuma, S. Miyashita, N. Usami, T. Ujihara, K. Fujiwara, and K. Nakajima, “Development of the in-situ monitoring system of the position and temperature at the crystal-solution interface”, J. Cryst. Growth (submitted).

2. 口頭発表

(1) K. Nakajima, T. Ujihara, S. Miyashita and G. Sazaki, “Phase diagrams and stable structures for Stranski-Krastanov mode of III-V ternary quantum dots” (invited), '99 International Conference of The Korean Association of Crystal Growth (KACG) and 6th Korea-Japan Electronic Materials Growth Symposium (K-J EMGS), Seoul, Korea, June 6-9

(2) K. Nakajima, S. Miyashita and G. Sazaki, “Thickness-composition diagrams of Stranski-Krastanov mode for III-V ternary systems”, Eleventh American Conference on Crystal Growth & Epitaxy, Tucson, Arizona, USA, August 1-6 (1999).

(3) K. Nakajima, T. Ujihara, S. Miyashita, G. Sazaki, “Phase diagrams of the Stranski-Krastanov mode for III-V ternary quantum dots” (invited), 1999 Xianshan Science Conferences on Photonics and Nonlinear Optical Crystals, Beijing, China, November 1-4 (1999)..

(4) K. Nakajima, T. Ujihara, S. Miyashita, and G. Sazaki, “Effects of the dislocation density and surface energy on phase diagrams of the S-K mode for the GaInN/GaN and GaPSb/GaP systems”, in Materials Research Society 2000 Spring Meeting, San Francisco, California, USA

(5) K. Nakajima, T. Ujihara, S. Miyashita, and G. Sazaki, “Phase diagram calculation for epitaxial growth of GaInAs on InP considering the surface, interface and strain energies”, Twelfth American Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Vail, Colorado, USA, August 13-18 (2000).

(6) G. Sazaki, T. Ujihara, Y. Azuma, S. Miyashita, N. Usami, and K. Nakajima, “Development of in-situ monitoring system of the position and temperature at the crystal-solution interface”, The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, Sendai, Japan, August 29-September 1, 2000.

(7) T. Ujihara, S. Miyashita, G. Sazaki, N. Usami, and K. Nakajima, “In-situ measurement of concentration distribution of zinc in a gallium solution using the X-ray fluorescence spectrometry”,

The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, Sendai, Japan, August 29-September 1, 2000.

(8) N. Usami, M. Miura, K. Nakajima, and Y. Shiraki, "Investigation of the growth mode of stacked Ge islands on Si(100) by photoluminescence spectroscopy and atomic force microscopy", The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, August 29-September 1, 2000, Sendai, Japan

(9) N. Usami, M. Miura, Y. Ito, Y. Araki, K. Nakajima and Y. Shiraki, "Modification of the growth mode of Ge on Si(100) in the presence of buried Ge islands", Eleventh International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Beijing, China, September 10-15 (2000).

(10) Y. Azuma, N. Usami, T. Ujihara, G. Sazaki, Y. Murakami, K. Fujiwara, S. Miyashita and K. Nakajima, "Successful fabrication of SiGe bulk crystal with uniform composition as a substrate for Si-based heterostructures", First International Workshop on New Group IV SiGe(C) Semiconductors: Control of Properties and Applications to Ultrahigh Speed and Opto-Electronic Devices, Sendai, Japan, January 21-23 (2001).

(11) 中嶋 一雄

「Stable structure of Stranski-Krastanov mode in the GaPSb/GaP system」

第 18 回電子材料シンポジウム、紀伊白浜、1999 年 6 月 30 日-7 月 2 日

(12) 中嶋 一雄、宇治原 徹、宮下 哲、佐崎 元

「GaInN/GaN 系ヘテロ構造の成長モード状態図に与える転位と AlN バッファ層の効果」

応用物理学会第 47 回連合講演会 28a-YQ-1、2000 年 3 月、青山学院大

(13) 宇佐美 徳隆、荒木 靖博、伊藤 慰之、三浦 真、白木 靖寛

「Si(100)上の Ge ドット積層構造における成長様式」

応用物理学会第 47 回連合講演会、2000 年 3 月、青山学院大

(14) 宇佐美 徳隆、我妻 幸長、宇治原 徹、佐崎 元、宮下 哲、村上 義弘、中嶋 一雄

「ゾーン成長における固液界面位置のその場観察と SiGe バルク結晶作製への応用」

応用物理学会第 61 回学術講演会 3a-ZB-10、2000 年 9 月 3-7 日、北海道工大

(15) 佐崎 元、宇治原 徹、我妻 幸長、宇佐美 徳隆、宮下 哲、中嶋 一雄

「結晶溶液界面における位置と温度のその場モニタリングシステムの開発」

応用物理学会第 61 回学術講演会 3p-Z-12、2000 年 9 月 3-7 日、北海道工大

(16) 我妻 幸長、宇佐美 徳隆、宇治原 徹、佐崎 元、宮下 哲、村上 義弘、中嶋 一雄

「SiGe 均一組成バルク単結晶の成長」

応用物理学会第 61 回学術講演会 3p-Z-13、2000 年 9 月 3-7 日、北海道工大

(17) 宇治原 徹、佐崎 元、宇佐美 徳隆、中嶋 一雄

「高温溶液中の組成分布変化その場測定」

応用物理学会第 61 回学術講演会 3p-Z-14、2000 年 9 月 3-7 日、北海道工大

(18) 中嶋 一雄、宇治原 徹、佐崎 元、宇佐美 徳隆

「歪み・表面・界面エネルギーを考慮した状態図の計算」

応用物理学会第 61 回学術講演会 4a-ZA-3、2000 年 9 月 3-7 日、北海道工大

(19) 宇治原 徹、佐崎 元、藤原 航三、宇佐美 徳隆、中嶋 一雄

「高温溶液組成その場測定とそれを用いた拡散係数測定」

日本金属学会 2001 年春季大会、2001 年 3 月、千葉工業大学

(20) 中嶋 一雄、宇佐美 徳隆、我妻 幸長、佐崎 元、宇治原 徹、藤原 航三、村上 義弘、穴戸 統悦

「成長界面位置のその場制御法を用いた均一組成の SiGe バルク結晶の成長」

日本金属学会 2001 年春季大会、2001 年 3 月、千葉工業大学

(21) 我妻 幸長、宇佐美 徳隆、宇治原 徹、佐崎 元、宮下 哲、村上 義弘、藤原 航三、中嶋 一雄

「成長界面のその場観察による均一組成 SiGe バルク結晶の成長」

応用物理学会第 48 回連合講演会、2001 年 3 月、明治大学

(22) 中嶋 一雄、宇佐美 徳隆、藤原 航三、村上 義弘、宇治原 徹、佐崎 元、穴戸 統悦

「ミクロ分散的組成分布を持った新しい太陽電池用多結晶 SiGe の融液成長」

応用物理学会第 48 回連合講演会、2001 年 3 月、明治大学

(23) 宇佐美 徳隆、我妻 幸長、宇治原 徹、佐崎 元、藤原 航三、村上 義弘、中嶋 一雄

「固液界面の「その場観察」を利用した SiGe バルク結晶の作製と光学特性」

応用物理学会第 48 回連合講演会、2001 年 3 月、明治大学

(24) 宇佐美 徳隆、我妻 幸長、宇治原 徹、佐崎 元、中嶋 一雄、矢ヶ部 喜行、近藤 高志、黄 晋二、白木 靖寛、張 保平、瀬川 勇三郎、児玉 茂夫

「宇宙用太陽電池材料を目指した SiGe 基板上の GaAs の MBE 成長」

応用物理学会第 48 回連合講演会、2001 年 3 月、明治大学

成果報告

溶質元素補給ゾーン成長法による 均一組成を持った多元系バルク単結晶の開発

溶質元素補給ゾーン成長法による 均一組成を持った多元系バルク単結晶の開発

はじめに

半導体デバイスの多くは、半導体基板へのエピタキシャル成長を利用して作製されるが、格子整合できる良質な基板が限定されているため、目的とするデバイス特性を実現できないケースが極めて多い。また、構成材料間の格子不整合に起因した「歪み」を内包する薄膜を、機能性向上のために利用したデバイスも多く、「歪み」は物質設計の重要パラメータになっている。しかし、格子不整合系のエピタキシャル成長においては、転位発生や成長モード遷移の臨界膜厚を考慮しなければならず、歪みを利用した物質設計の自由度を狭めている。

基板の格子定数・バンドギャップの選択肢を拡大する手法として、最も確実な方法は、組成の均一な多元系バルク結晶を作製し、基板とすることである。しかし、多元系基板を実現することは極めて困難であった。これは、多元系結晶の状態図が全率固溶型である場合が多く、成長界面の温度や溶液組成に敏感に結晶組成が変化するためである。

そこで、本研究においては、固液界面の位置・温度の「その場観察」技術を独自に開発するとともに、この手法を結晶成長中に溶質元素の補給が可能な多元素系のゾーン成長法 (Multicomponent Zone-melting Method) という結晶成長法と融合することにより、成長界面温度の精密な制御を行い、基板として利用可能な均一組成を有する多元系バルク結晶の作製に取り組んだ。本研究の範囲においては、研究の対象をSiGeに限定して行った。SiGeは、歪みを内包するSi薄膜・Ge薄膜、歪み補償型の機能性量子構造など、優れた電子・光物性の発現に対して期待されている。また、GaAsに対する格子整合基板として、超高効率宇宙用太陽電池へ

の応用も期待されている。前者の研究は、Si超LSIで表面化している低キャリア移動度による低い電流駆動力の問題、短チャンネル効果の問題等を打破し、21世紀のエレクトロニクスを開拓することへと直結している。Si超LSIに化合物半導体を凌駕する高移動度電子素子を導入するとともに、低い発光遷移確率を抜本的に向上させ究極の配線、すなわち、光インターコネクションの導入をも初めて可能とするものである。本研究は、無限の可能性を秘めた、多元系半導体バルク結晶と薄膜エピタキシャル成長の融合という新たな研究分野の第一歩となるものであろう。

実験手法

試料作製の手順を概説する。まず、図1に示したように、石英アンプル中に、Ge単結晶(種結晶)、Ge多結晶(融液形成用結晶)、Si結晶(補給用結晶)を並べて真空封入する。このアンプルを、本研究予算により購入したゾーンヒータ(マテルズMAT-40BTHM)によって形成される温度勾配中に配置する。典型的な試料の大きさは、それぞれ長さ10mm、20mm、10mmであり、直径は15mmで共通である。適切な温度勾配を選択することにより、Ge多結晶及びGe単結晶の一部を融解させる。Siは、Ge融液中に溶解し、濃度勾配により、固液界面へと拡散する。固液界面において過飽和状態が形成されれば、これが駆動力となり、SiGe結晶が成長するわけである。この手法においては、アンプルを固定したままでも、Siが供給され固液界面で結晶成長の駆動力が確保できれば、成長は起きる。しかし、成長により、界面位置が上昇すると、固液界面の温度が上昇してしまうので、結晶中のSi組成は増加することが予想される。組成一定の結晶を成長するには、成長速度と同じ速度で

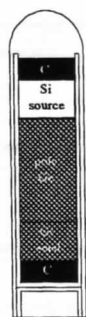


図 1 成長用アンブル内の結晶配置図。Ge 種結晶は (100)単結晶である。融液用 Ge 多結晶と、補給用 Si 結晶を重ねて配置してある。

アンブルを引き下げることにより、界面位置を一定に保ち、成長温度を一定に制御する必要がある。

成長温度の精密な制御を行うために、図 2 に示すように、成長界面の位置・温度の「その場観察」システムを開発した。結晶成長炉の断熱材を一部取り除くことにより、10mmx90mm の観察用石英製スリットを設置し、内部の観察を可能とした。可視光(400-800nm) 像を利用して、固液界面の位置を CCD により観察する。図 3 に Ge 融液を利用した観測例を示すが、液体金属と固体の反射率差に起因して、特別な画像処理を施さずとも、界面の位置は明瞭に観測された。Si のビームスプリッターを透過する赤外光(3.0-3.25 μ m)により、サーモビューアーを利用して温度分布が観測できるので、成長中の界面の位置・温度が「その場観察」できるわけである。現状の設定では、空間分解能および温度分解能は、それぞれ約 300 μ m および $\pm 2^{\circ}\text{C}$ である。

本研究においては、まずアンブルを固定したまま成長を行い、界面位置の時間変化を観測した。そこから見積もられる成長速度を基に、引き下げ速度を見積もり、その最適化を行うために、さまざまな引き下げ速度で結晶成長を行った。得られた結晶は、成長方向と平行に、中心部で切断し、

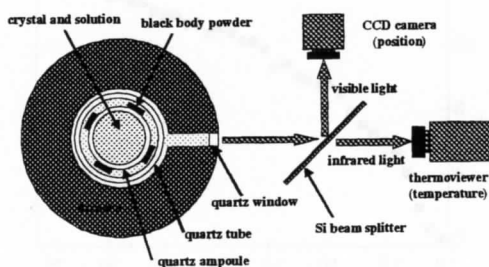


図 2 固液界面における位置・温度の「その場観察」システム。可視光を利用して界面位置を、赤外光を利用して温度分布を測定する。

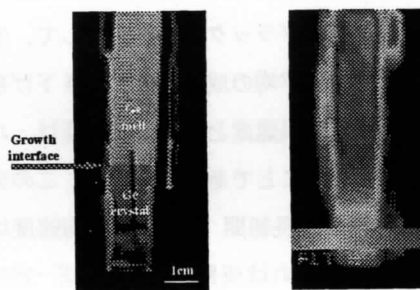


図 3 Ge 融液を利用した、固液界面の位置・温度の観測例。

機械研磨、化学研磨を施した後に、EDX により組成分布測定を行った。なお、本書で報告する範囲では、サーモビューアーを利用した結果が含まれていないが、炉体からの反射光成分の影響を除去するための黒体の種類・形状などの最適化、温度較正などを現在行っている段階である。

実験結果

図 4 に、固定成長の場合の界面位置の成長時間依存性を示す。この傾きから見積もられる成長速度は、一定ではなく、成長初期には急激に増加した後に、減少し、一定速度に収束していくように

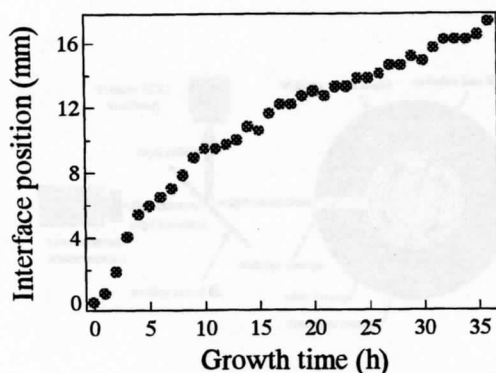


図 4. 固定成長の場合の界面位置の成長時間依存性。成長初期には、界面位置が急激に上昇しているが、ほぼ一定速度に収束していく。

見える。この傾向は、成長速度が Si の拡散によって律速されるという理論から説明される。重要なのは、結晶成長炉をブラックボックスとして、予備的な成長を行って平均の成長速度で引き下げを行ったとしても、成長速度と引き下げ速度は、バランスしないということである。実際に、このデータから得られる成長初期 15mm の平均速度は 0.5mm/h であるが、これは成長速度が、ほぼ一定になった時の値、 $0.27 \pm 0.04 \text{ mm/h}$ とは、大きく異なっている。

図 5 は、引き下げ速度の最適化を行うために、先ほどの一定値近傍で、引き下げ速度を変化させて成長を行った場合の界面位置の時間変化を示す。

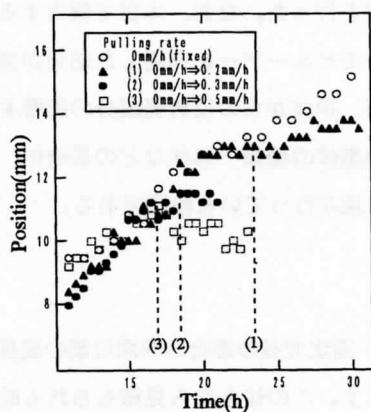


図 5. 引き下げ速度を変化させた場合の、界面位置の成長時間依存性。点線は、引き下げを開始した時間を示す。0.3mm/h の引き下げ速度で、界面位置がほぼ一定に保たれていることがわかる。

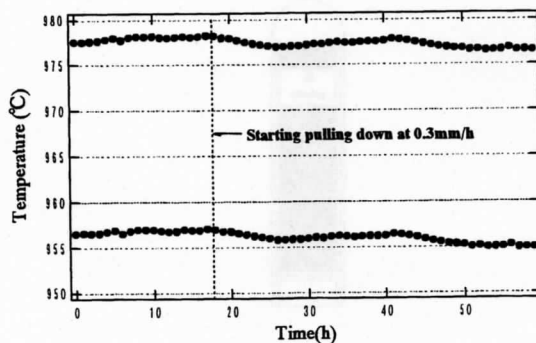


図 6. アンブルを引き下げた場合の炉内の温度の時間変化。引き下げによる、温度の変化は、ほぼ無視できる。

引き下げを開始するまでは、アンブルを固定して成長を行っており、引き下げを開始した位置は、図に点線で示してある。0.2mm/h、0.5mm/h では、界面位置が、それぞれ上昇、下降している。引き下げ速度を 0.3mm/h とした場合に、界面位置が、ほぼ一定に保たれていることがわかる。図 6 に、炉内に配置された熱電対によって測定された、アンブル引き下げに伴う温度変化を示す。この間の温度変化は、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 内に保たれており、アンブル引き下げによる、炉内の温度勾配の変化は無視できる。よって、界面位置が、ほぼ一定に保たれていれば、界面温度が一定に制御され、均一な組成のバルク結晶が作製できていることが期待できる。

図 7 に、作製した結晶の組成分布を示す。引

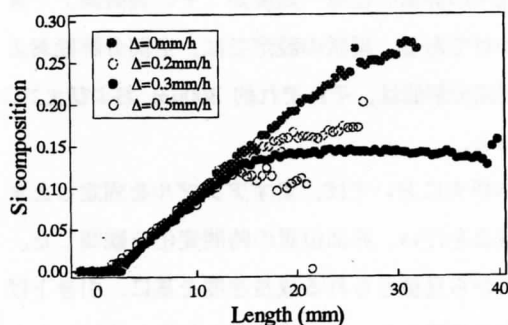


図 7. 成長した結晶の組成分布。引き下げ速度を 0.3mm/h において、界面の温度が一定に保たれ、長さ 20mm 以上にわたって組成が均一なバルク結晶が実現できている。

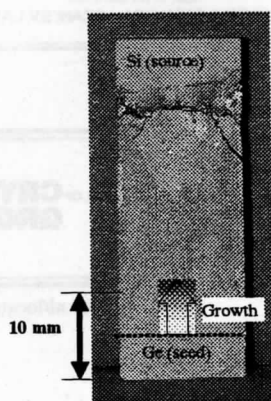


図 8. Secco エッチ後の結晶の断面写真。

き下げ速度 0.3mm/h の場合は、Ge 多結晶の長さを 40mm とした時のデータを示してあるが、長さ 20mm 以上にわたって均一な結晶が作製できていることがわかる。

図 8 に、Secco エッチングを施した典型的な結晶の断面写真を示す。初期界面から、およそ 15mm 成長した段階で多結晶化が起きている。また、Si 補給用結晶と、SiGe の境界部分には、クラックが発生していることがわかる。図 9 は、励起場所を変化させて測定した 9K における発光スペクトルである。補給用 Si 結晶、および Si 結晶近傍の SiGe からの発光は、欠陥に起因すると思われる深い準位からの発光が支配的であった。一方、傾斜組成領域においては、バンド端発光が支配的であり、深い準位からの発光は観測されなかった。また、組成変化に対応したバンドギャップの変化も観測された。よって、本研究において作製したバルク結晶は、補給用 Si 近傍を除けば、機能性薄膜を形成するための SiGe 基板として十分期待できるものと考えられる。

まとめ

成長界面の位置・温度の「その場観察」技術を開発し、均一組成を有する SiGe バルク結晶の作製に適用することを試みた。

界面位置の変化から成長速度を見積もり、その

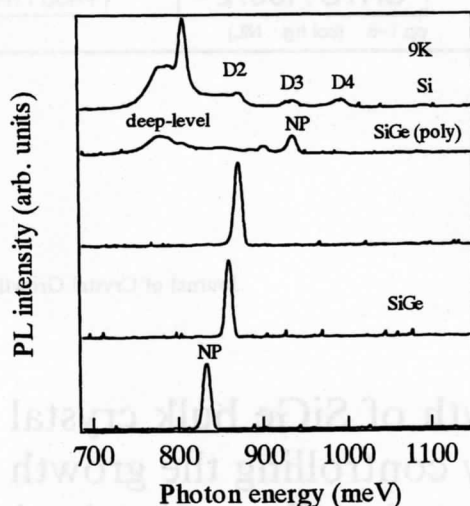


図 9. 結晶のフォトルミネッセンススペクトル、単結晶領域では、組成変化に伴うバンドギャップの変化が見られる。補給用 Si 結晶近傍の多結晶領域では、深い準位からの発光が支配的である。

データに基づき、界面位置を一定に保つための引き下げ速度の最適化を行った。

その結果、界面位置を一定に保ちながら成長することに成功し、長さ 20mm 以上にわたり組成均一なバルク結晶の作製に成功した。

これは、多元系結晶基板と、エピタキシャル成長技術を融合し、機能性結晶を得るための第一歩といえよう。

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録しておりません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。